



## DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITE DE COOPERATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(51) Classification internationale des brevets <sup>7</sup> : <b>G10K 11/34, G01S 5/14, 5/30, G01N 29/26</b>	<b>A1</b>	(11) Numéro de publication internationale: <b>WO 00/33292</b> (43) Date de publication internationale: 8 juin 2000 (08.06.00)
---	-----------	--

(21) Numéro de la demande internationale: PCT/FR99/02912

(22) Date de dépôt international: 25 novembre 1999 (25.11.99)

(30) Données relatives à la priorité:

98/14971 27 novembre 1998 (27.11.98) FR

(71) Déposant (pour tous les Etats désignés sauf US): COMMIS-SARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE [FR/FR]; 31-33, rue de la Fédération, F-75752 Paris 15ème (FR).

(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants (US seulement): BOLOMEY, Jean-Charles [FR/FR]; 10, rue Toussaint Féron, F-75013 Paris (FR). CATIAUX, Gérard [FR/FR]; 1, rue de la Perruche, F-78117 Chateaufort (FR). CHATILLON, Sylvain [FR/FR]; 11, rue Marx Dormoy, F-93330 Neuilly sur Marne (FR). JOISEL, Alain [FR/FR]; 9, rue Marthe-Edouard, F-92190 Meudon (FR). SERRE, Marc [FR/FR]; 27, rue de Satory, F-78000 Versailles (FR).

(74) Mandataire: LEHU, Jean; Brevatome, 3, rue du Docteur Lancereaux, F-75008 Paris (FR).

(81) Etats désignés: CA, JP, US, brevet européen (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE).

Publiée

Avec rapport de recherche internationale.

(54) Title: MULTIELEMENT ULTRASONIC CONTACT TRANSDUCER

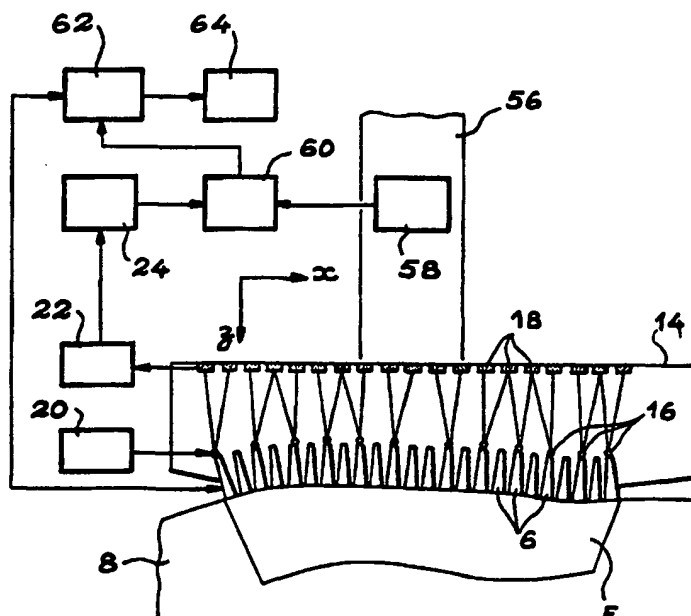
(54) Titre: TRANSDUCTEUR ULTRASONORE DE CONTACT, A ELEMENTS MULTIPLES

## (57) Abstract

The invention concerns a multielement contact ultrasonic comprising means (16 to 24, 56 to 60) for determining the respective positions of elements transmitting ultrasounds (6) relative to an object to be controlled (8) during the displacement of the transducer. Means (62) generate driving current pulses, establish, at various predetermined positions, delay laws enabling the transmitting elements to generate a focused ultrasound beam (F) and apply said laws to the driving current pulses. The elements receiving ultrasounds supply signals for forming images concerning the object. The invention is applicable in medicine and non-destructive testing.

## (57) Abrégé

Ce transducteur comprend des moyens (16 à 24, 56 à 60) de détermination des positions respectives des éléments émetteurs d'ultrasons (6) par rapport à un objet à contrôler (8) au cours du déplacement du transducteur. Des moyens (62) engendrent des impulsions d'excitation des éléments émetteurs, établissent, à partir des positions déterminées, des lois de retard permettant aux éléments émetteurs d'engendrer un faisceau ultrasonore focalisé (F) et appliquent ces lois aux impulsions d'excitation. Les éléments récepteurs d'ultrasons fournissent des signaux permettant la formation d'images relatives à l'objet. Application à la médecine et au contrôle non destructif.



# **UNIQUEMENT A TITRE D'INFORMATION**

Codes utilisés pour identifier les Etats parties au PCT, sur les pages de couverture des brochures publiant des demandes internationales en vertu du PCT.

AL	Albanie	ES	Espagne	LS	Lesotho	SI	Slovénie
AM	Arménie	FI	Finlande	LT	Lituanie	SK	Slovaquie
AT	Autriche	FR	France	LU	Luxembourg	SN	Sénégal
AU	Australie	GA	Gabon	LV	Lettonie	SZ	Swaziland
AZ	Azerbaïdjan	GB	Royaume-Uni	MC	Monaco	TD	Tchad
BA	Bosnie-Herzégovine	GE	Géorgie	MD	République de Moldova	TG	Togo
BB	Barbade	GH	Ghana	MG	Madagascar	TJ	Tadjikistan
BE	Belgique	GN	Guinée	MK	Ex-République yougoslave de Macédoine	TM	Turkménistan
BF	Burkina Faso	GR	Grèce	ML	Mali	TR	Turquie
BG	Bulgarie	HU	Hongrie	MN	Mongolie	TT	Trinité-et-Tobago
BJ	Bénin	IE	Irlande	MR	Mauritanie	UA	Ukraine
BR	Brésil	IL	Israël	MW	Malawi	UG	Ouganda
BY	Bélarus	IS	Islande	MX	Mexique	US	Etats-Unis d'Amérique
CA	Canada	IT	Italie	NE	Niger	UZ	Ouzbékistan
CF	République centrafricaine	JP	Japon	NL	Pays-Bas	VN	Viet Nam
CG	Congo	KE	Kenya	NO	Norvège	YU	Yougoslavie
CH	Suisse	KG	Kirghizistan	NZ	Nouvelle-Zélande	ZW	Zimbabwe
CI	Côte d'Ivoire	KP	République populaire démocratique de Corée	PL	Pologne		
CM	Cameroun	KR	République de Corée	PT	Portugal		
CN	Chine	KZ	Kazakhstan	RO	Roumanie		
CU	Cuba	LC	Sainte-Lucie	RU	Fédération de Russie		
CZ	République tchèque	LI	Liechtenstein	SD	Soudan		
DE	Allemagne	LK	Sri Lanka	SE	Suède		
DK	Danemark	LR	Libéria	SG	Singapour		
EE	Estonie						

**TRANSDUCTEUR ULTRASONORE DE CONTACT, À ÉLÉMENTS  
MULTIPLES**

**DESCRIPTION**

**DOMAINE TECHNIQUE**

5                   La présente invention concerne un transducteur ultrasonore de contact, à éléments multiples.

                  Elle s'applique notamment à la médecine et au contrôle non destructif de pièces mécaniques, en  
10 particulier de pièces ayant une forme complexe ou un état de surface irrégulier par exemple du fait d'un meulage.

**ÉTAT DE LA TECHNIQUE ANTÉRIEURE**

                  Dans de nombreux domaines industriels, et  
15 en particulier dans le cas des centrales nucléaires, le contrôle par un transducteur ultrasonore de contact joue un rôle important dans l'inspection des matériaux.

                  Cette technique consiste à déplacer ce transducteur ultrasonore directement au contact d'une  
20 pièce à inspecter. Pour chacune de ses positions, le transducteur émet des impulsions ultrasonores et enregistre les échos réfléchis par la structure et éventuellement les défauts de la pièce.

                  Cependant, de nombreux aspects géométriques  
25 rendent difficile l'usage des ultrasons : accessibilité limitée (en particulier pour les branchements), états

de surface variables, variation des profils. Les transducteurs utilisés lors de ces contrôles sont des transducteurs classiques qui ne permettent pas une optimisation de l'examen.

5           En fonction des zones, on peut par exemple observer des variations de sensibilité liées à un mauvais contact entre le transducteur et la pièce contrôlée, une imprécision de localisation due à une désorientation du transducteur appuyé contre la pièce,  
10 une couverture partielle d'une soudure lorsque le transducteur est bloqué par la configuration de la surface.

Lors de contrôles réalisés sur des pièces de configuration complexe, de nombreuses difficultés  
15 sont donc observées. Elles traduisent la limite des performances des transducteurs ultrasonores de contact classiques :

**1) Variation de l'épaisseur de la couche de couplage**

Lors du passage du transducteur ultrasonore  
20 sur une zone comportant un état de surface non conforme ou présentant des variations de configuration, le contact n'est pas optimal. Ainsi, la lame de couplage située entre la surface de l'échantillon contrôlé et la surface émettrice du transducteur présente une  
25 épaisseur variable. Le retard consécutif à la traversée de cette lame est donc différent pour les ondes ultrasonores émises en différents points de la surface du transducteur.

En outre, des phénomènes complexes  
30 d'interférences entre les différentes ondes successivement réfléchies interviennent dans cette

lame. Il en résulte une dégradation du faisceau ultrasonore, se traduisant par une perte de sensibilité du contrôle. La capacité du transducteur à détecter d'éventuels défauts s'en trouve ainsi limitée.

5    2) Désorientations du transducteur

Dans le cas du contrôle d'un échantillon présentant des variations de profil, le transducteur étant appuyé sur l'échantillon, son orientation varie au cours du contrôle. Ainsi, la direction de propagation de l'onde ultrasonore dans l'échantillon ne peut être maîtrisée puisqu'elle change au cours du déplacement du transducteur le long du profil.

Lors d'un contrôle effectué en mode manuel, le déplacement appliqué par l'opérateur ne peut être parfaitement rectiligne, ce qui engendre à nouveau une désorientation du faisceau ultrasonore transmis. L'information sur la localisation du défaut dans l'échantillon est alors perdue puisque la direction de propagation du faisceau dans cet échantillon est inconnue.

20    3) Accessibilité limitée

Dans certains cas, la configuration d'une pièce à contrôler interdit le déplacement du transducteur le long de cette pièce. La zone à contrôler ne peut être que partiellement couverte.

Examinons maintenant les solutions connues qui permettent de résoudre ces problèmes.

La maîtrise du faisceau ultrasonore est obtenue en focalisant le faisceau transmis dans la pièce inspectée avec une profondeur de focalisation et une orientation prédéterminées.

Le principe de focalisation consiste à appliquer des retards à la surface émettrice de manière que l'ensemble des contributions parviennent en phase au point focal désiré.

5 Dans le cas des transducteurs monolithiques, la distribution des retards est obtenue physiquement en appliquant une lentille déphasante mise en forme sur la surface d'émission. Un tel système est donc figé et ne peut être satisfaisant dans le cas où  
10 la surface de la pièce présente des variations de configuration.

Une mise en forme dynamique du faisceau ultrasonore requiert l'utilisation de transducteurs à éléments multiples ou transducteurs multi-éléments. Les  
15 retards sont affectés électroniquement à chaque élément du transducteur, ce qui permet de modifier les caractéristiques du faisceau ultrasonore engendré par un unique élément et donc de commander la focalisation du faisceau et, en même temps, de compenser les  
20 déformations occasionnées par des surfaces de configuration variable.

#### **1) Transducteurs multi-éléments en immersion**

Le contrôle d'une pièce présentant un profil variable peut être réalisé avec un transducteur  
25 multi-éléments immergé dans un liquide de couplage, par exemple de l'eau. Dans ce cas, le transducteur n'est plus placé directement au contact de la pièce mais en est séparé par une couche d'eau suffisamment épaisse pour que les phénomènes d'interférences entre les  
30 différentes ondes ultrasonores successivement

réfléchies dans la lame de couplage (lame d'eau dans l'exemple considéré) soient fortement réduits.

5 Lors du contrôle d'une pièce de configuration complexe, la focalisation du faisceau ultrasonore est obtenue en calculant les parcours, dans l'eau et le matériau dont est faite cette pièce (par exemple l'acier), des ondes ultrasonores émises par les différents éléments du transducteur vers le point focal, et ce pour chaque position du transducteur.

10 Cette solution entraîne d'importantes difficultés. Le calcul de la loi de retard adaptée implique la connaissance de la configuration exacte de la pièce ainsi que la position et l'orientation du transducteur par rapport à la pièce.

15 En outre, ce mode de contrôle n'est pas toujours utilisable en milieu industriel. En effet l'immersion locale de la pièce peut être difficile à réaliser en particulier pour des raisons d'accessibilité limitée.

20 **2) Transducteurs multi-éléments de contact**

Des transducteurs multi-éléments de contact sont également utilisés. Cependant, les dégradations du champ transmis dues à un contact inadapté restent présentes lors du contrôle de pièces de configuration  
25 complexe.

Des techniques algorithmiques sont développées afin de compenser cette dégradation, mais elles demeurent peu satisfaisantes car elles nécessitent la présence de défauts connus dans la  
30 pièce.

Une solution, récemment développée, consiste en l'utilisation d'un transducteur de contact multi-éléments dont la surface émettrice est déformable, de façon à s'adapter à la surface exacte de la pièce. Dans ce cas, le contact est optimal, la lame de couplage située entre la surface émettrice et la pièce contrôlée restant suffisamment fine et homogène pour ne pas perturber la transmission de l'onde.

Citons en particulier le transducteur connu par les documents [1], [2] et [4] (qui, comme les autres documents cités par la suite, sont mentionnés à la fin de la présente description), transducteur qui est obtenu à partir de plaquettes piézoélectriques rigides (en céramique) noyées dans un substrat souple qui est passif vis-à-vis des ultrasons.

Cependant, la maîtrise du faisceau ultrasonore transmis en vue d'une optimisation de la caractérisation des défauts nécessite ici encore la connaissance exacte de la géométrie de la pièce contrôlée ainsi que de la position et de l'orientation du transducteur par rapport à cette pièce.

#### EXPOSÉ DE L'INVENTION

La présente invention vise à améliorer la performance du contrôle, par des ultrasons, d'un objet (pièce mécanique ou même partie du corps humain) ayant une configuration complexe, en vue de mieux détecter, localiser et caractériser les défauts que cet objet est susceptible de comporter.



L'amélioration de cette performance nécessite la maîtrise du faisceau ultrasonore transmis dans l'objet, en particulier en ce qui concerne la profondeur de focalisation et l'orientation de ce  
5 faisceau.

De façon précise, la présente invention a pour objet un transducteur ultrasonore de contact, à éléments multiples, chaque élément étant émetteur et/ou récepteur d'ultrasons, le transducteur étant destiné à  
10 être déplacé par rapport à un objet à contrôler et ayant une surface émettrice déformable qui est destinée à être en contact avec la surface de cet objet et à partir de laquelle les ultrasons sont émis vers l'objet, des moyens de commande étant prévus pour  
15 engendrer des impulsions d'excitation des éléments émetteurs, ce transducteur étant caractérisé en ce qu'il comprend des moyens de détermination des positions respectives des éléments émetteurs d'ultrasons par rapport à l'objet au cours du  
20 déplacement du transducteur, des moyens de traitement étant prévus pour :

- établir, à partir des positions ainsi déterminées, des lois de retard permettant aux éléments émetteurs d'engendrer un faisceau ultrasonore focalisé, dont  
25 les caractéristiques sont maîtrisées par rapport à l'objet, et
- appliquer ces lois de retard aux impulsions d'excitation,

les éléments récepteurs d'ultrasons étant destinés à  
30 fournir des signaux permettant la formation d'images relatives à l'objet.

Grâce à l'invention, la connaissance de la configuration exacte de l'objet n'est plus nécessaire puisqu'elle est mesurée par le transducteur. Ce dernier est alors capable de fonctionner de manière autonome  
5 puisqu'il s'adapte à la configuration réelle du contrôle réalisé, par mesure, analyse, et compensation de la déformation de la surface émettrice de ce transducteur.

On peut ainsi considérer que ce  
10 transducteur est « intelligent ».

Selon un premier mode de réalisation particulier du transducteur objet de l'invention, les éléments multiples sont formés d'une lame de polymère piézoélectrique souple et d'un réseau d'électrodes  
15 juxtaposées obtenues par dépôt métallique.

Selon un deuxième mode de réalisation particulier, les éléments multiples sont des éléments piézoélectriques rigides, noyés dans un substrat souple qui est passif vis-à-vis des ultrasons.

20 Selon un troisième mode de réalisation particulier, les éléments multiples sont rigides et assemblés mécaniquement les uns aux autres de manière à former une structure articulée.

Selon un mode de réalisation préféré du  
25 transducteur objet de l'invention, les moyens de détermination des positions respectives des éléments émetteurs d'ultrasons par rapport à l'objet comprennent :

- des premiers moyens prévus pour déterminer les  
30 positions respectives des éléments émetteurs par rapport à une partie indéformable du transducteur,

par mesure de la déformation de la surface émettrice,  
et pour fournir des signaux représentatifs des  
positions ainsi déterminées,

- 5 - des deuxièmes moyens prévus pour déterminer la position et l'orientation de cette partie indéformable du transducteur par rapport à l'objet et pour fournir des signaux représentatifs de la position et de l'orientation ainsi déterminées, et
- 10 - des troisièmes moyens prévus pour fournir les positions respectives des éléments émetteurs d'ultrasons par rapport à l'objet à partir des signaux fournis par ces premiers et deuxièmes moyens.

De préférence, les premiers moyens comprennent :

- 15 - des moyens de mesure de la distance, par rapport à des points distincts et fixes de la partie indéformable du transducteur, de la face-arrière de chaque élément d'un sous-ensemble des éléments émetteurs d'ultrasons, et
- 20 - des moyens de traitement auxiliaire prévus pour déterminer la position de chaque élément émetteur d'ultrasons, à partir des distances ainsi déterminées.

Selon un premier mode de réalisation  
25 particulier de l'invention, les moyens de mesure de la distance comprennent :

- des émetteurs auxiliaires d'ultrasons respectivement  
fixés aux faces-arrières des éléments du sous-  
ensemble et prévus pour émettre des ultrasons les uns  
30 après les autres,

- des récepteurs auxiliaires d'ultrasons fixés à la partie indéformable et prévus pour détecter les ultrasons émis par les émetteurs auxiliaires, et
- des moyens de mesure de la distance de chaque émetteur auxiliaire par rapport à chaque récepteur d'un groupe de récepteurs auxiliaires recevant les ultrasons de plus grande intensité.

Selon un deuxième mode de réalisation particulier de l'invention, les moyens de mesure de la distance comprennent :

- une source de micro-ondes,
- une pluralité d'antennes micro-ondes rigidement solidaires de la partie indéformable, couplées à cette source et prévues pour émettre, les unes après les autres, des micro-ondes et pour recevoir, également les unes après les autres, des micro-ondes,
- des sondes de micro-ondes respectivement fixées aux faces-arrières des éléments du sous-ensemble et prévues pour diffuser les micro-ondes émises par les antennes, ces sondes étant respectivement munies de dispositifs non-linéaires prévus pour moduler, à des fréquences différentes, les micro-ondes respectivement diffusées par les sondes, et
- des moyens de réception des micro-ondes couplés aux antennes et prévus pour mesurer la distance de chaque sonde à chaque antenne par mesure de la phase des micro-ondes diffusées par cette sonde et reçues par cette antenne, ces moyens de réception étant en outre prévus pour distinguer les sondes les unes des autres par détection synchrone aux différentes fréquences de modulation.

De préférence, les moyens de traitement auxiliaires sont prévus pour déterminer, par une méthode d'interpolation, un profil passant au mieux par les faces-arrières des éléments du sous-ensemble et  
5 pour déterminer, à partir de ce profil, la position de la face émettrice de chaque élément émetteur d'ultrasons par rapport à la partie indéformable du transducteur.

Les deuxièmes moyens peuvent comprendre un  
10 bras mécanique articulé, solidaire de la partie indéformable du transducteur.

#### BRÈVE DESCRIPTION DES DESSINS

La présente invention sera mieux comprise à la lecture de la description d'exemples de réalisation  
15 donnés ci-après, à titre purement indicatif et nullement limitatif, en faisant référence aux dessins annexés sur lesquels :

- la figure 1 est une vue schématique de la surface émettrice d'une barrette linéaire d'éléments  
20 émetteurs-récepteurs d'ultrasons,
- la figure 2 illustre schématiquement un exemple de déformation de la barrette de la figure 1 sur un profil quelconque,
- la figure 3 illustre schématiquement un principe  
25 de triangulation utilisable dans l'invention,
- la figure 4 est une vue schématique d'un premier mode de réalisation particulier du transducteur objet de l'invention, qui utilise des capteurs ultrasonores auxiliaires,

- la figure 5 illustre schématiquement le principe d'une méthode de diffusion (« scattering method »), utilisable dans l'invention,
- 5   • la figure 6 est une vue schématique d'un deuxième mode de réalisation particulier du transducteur objet de l'invention, qui utilise des antennes à micro-ondes, et
- 10   • les figures 7 à 9 illustrent schématiquement trois étapes d'un algorithme utilisable dans l'invention.

#### EXPOSÉ DÉTAILLÉ DE MODES DE RÉALISATION PARTICULIERS

On considère un transducteur ultrasonore conforme à l'invention. Il s'agit d'un transducteur à éléments multiples, dont la surface émettrice est  
15 déformable.

Cette surface émettrice est destinée à être déplacée sur la surface d'un objet à contrôler tout en étant maintenue en contact avec cette surface de l'objet.

20       De plus, conformément à l'invention, ce transducteur comprend une instrumentation de mesure de la déformation de sa surface émettrice donnant ainsi la position des éléments piézo-électriques par rapport à la partie rigide du transducteur, et on mesure la  
25 position (3 coordonnées) et l'orientation (3 composantes) de la partie rigide du transducteur par rapport à l'objet.

Par souci de clarté, on considère dans ce qui suit un transducteur ultrasonore du type barrette

linéaire 2 (figure 1) n'encaissant des déformations que dans le plan d'incidence des ultrasons, plan (x,z) des figures 1 et 2.

La découpe de la surface émettrice de ce transducteur en éléments indépendants 4 n'est réalisée que selon une direction, Ly de la figure 1.

Les paramètres géométriques d'une telle barrette 2 sont représentés sur la figure 1 où les notations sont les suivantes :

- 10 Lx : longueur dans le plan d'incidence (x, z)
- Ly : largeur dans le plan perpendiculaire (y, z) au plan d'incidence
- p : distance entre les centres respectifs de deux éléments adjacents
- 15 dx : largeur d'un élément.

Les valeurs de ces paramètres sont déterminées en fonction de l'application et des caractéristiques acoustiques choisies, à savoir la fréquence centrale et la largeur de bande du signal.

20 Ce transducteur linéaire (c'est-à-dire à une dimension) permet de compenser les déformations de la surface dans le plan d'incidence (x,z) de la figure 2.

Ce concept peut être appliqué à la réalisation de transducteurs ultrasonores du type matriciel dont la découpe de la surface émettrice, effectuée selon les deux directions x et y, permet la maîtrise du faisceau ultrasonore dans toutes les directions de l'espace à trois dimensions.

30 En ce qui concerne la nature déformable du transducteur, plusieurs techniques peuvent être

envisagées. Elles sont définies par la nature du matériau piézoélectrique utilisé.

Ainsi, la surface émettrice peut être constituée d'une lame de polymère piézoélectrique souple, typiquement du PVDF, et d'un réseau d'électrodes juxtaposées obtenues par dépôt métallique (voir articles [1] et [2]).

De même, une technique décrite dans les documents [1], [2] et [4] consiste en l'utilisation d'un ensemble d'éléments piézoélectriques rigides coulés dans un substrat souple passif (c'est-à-dire inerte) vis-à-vis des ultrasons.

Enfin, une technique, développée par la Société Metalscan, consiste en l'utilisation d'un ensemble d'éléments ultrasonores rigides qui sont assemblés mécaniquement de façon à obtenir une structure articulée.

Quelle que soit la technique, (existante ou spécifiquement développée), celle-ci doit permettre d'obtenir des déformations locales ayant un très faible rayon de courbure, typiquement 15 mm à 20 mm, et être transposable au cas de transducteurs ultrasonores du type matriciel.

Sur la figure 2, on a représenté un exemple de réalisation d'une telle barrette multi-éléments linéaire et déformable, à savoir celle qui est proposée par la Société Metalscan.

La forme trapézoïdale et les dimensions des éléments émetteurs-récepteurs d'ultrasons 6 sont étudiées pour permettre un débattement suffisant pour obtenir la déformation souhaitée.



Sur la figure 2, l'objet contrôlé a la référence 8. Chaque élément a une face active 10 en contact avec la surface de l'objet et une face-arrière 12 appelée « backing ».

5 Le transducteur de la figure 2 comprend aussi un boîtier indéformable 14 dont la barrette à éléments multiples 6 est rendue solidaire.

Selon l'invention, on intègre au sein du transducteur un système de mesure de la déformation de la face-avant de ce transducteur (cette face-avant contenant toutes les faces actives des éléments). Cette déformation est obtenue à partir d'une instrumentation spécifique que l'on va décrire.

10 Dans le cas d'une barrette à une dimension, la position d'un élément est déterminée par ses deux coordonnées  $(x, z)$ , mesurées dans le repère propre au transducteur.

La technique choisie pour obtenir les coordonnées (position) de chaque élément dans le repère du transducteur consiste en l'échantillonnage de la surface déformable par mesure des coordonnées d'un certain nombre d'éléments.

20 Une technique d'interpolation polynomiale est ensuite appliquée afin de déterminer les coordonnées de l'ensemble des éléments.

25 La mesure permettant d'obtenir cet échantillonnage est fondée sur le principe de la triangulation (figure 3).

Dans le cas présent, les coordonnées  $(x, z)$  d'un point de la face arrière d'un élément M peuvent être obtenues à partir de la mesure de deux distances

$d_1$ ,  $d_2$  le séparant de deux points distincts  $m_1$ ,  $m_2$  de coordonnées connues  $(x_1, z_1)$ ,  $(x_2, z_2)$ , ces points  $m_1$  et  $m_2$  étant séparés l'un de l'autre par une distance  $d$ .

L'instrumentation est donc composée d'un  
5 ensemble de capteurs permettant de mesurer, pour chaque élément  $E_i$  (figure 2) choisi pour l'échantillonnage, les distances  $D_{i1}$ ,  $D_{i2}$  le séparant respectivement de deux points parfaitement connus  $m_1$ ,  $m_2$  sur le boîtier 14 du transducteur.

10 Les capteurs de distance utilisés doivent répondre à de nombreuses exigences.

En premier lieu, la mesure des distances sert à la définition des lois de retard à appliquer à la barrette de sorte que la résolution doit être  
15 suffisamment fine. On choisit une résolution de l'ordre de  $\lambda/10$ , où  $\lambda$  est la longueur d'onde des ultrasons dans le matériau inspecté.

Par exemple, la fréquence des ultrasons étant de 2 MHz, et le matériau de l'acier, on obtient  
20 une longueur d'onde longitudinale de 2,95 mm. La résolution requise est donc de l'ordre de 0,3 mm.

En outre, l'instrumentation complète doit être intégrée au sein du transducteur de sorte que la dimension élémentaire des capteurs doit être très  
25 petite, de l'ordre de 1 mm.

Enfin, la plage de distance accessible à ces capteurs doit être de plusieurs millimètres.

Deux techniques de capteurs répondant à ces critères ont été sélectionnées.

La première technique consiste en l'utilisation d'émetteurs et de récepteurs ultrasonores (figure 4).

Un émetteur auxiliaire d'ultrasons 16 est  
5 fixé sur la face-arrière de chaque élément sélectionné pour l'échantillonnage parmi les éléments 6 et un ensemble de récepteurs auxiliaires d'ultrasons 18, dont on connaît les positions, sont fixés sur la face interne du boîtier 14 du transducteur, en regard de ces  
10 émetteurs 16.

A chaque émetteur 16 est associé dynamiquement un couple de récepteurs 18 en fonction de l'amplitude du signal reçu.

La distance d'un émetteur 16 à chaque  
15 récepteur associé 18 est estimée par mesure du temps de vol de l'onde ultrasonore issue de cet émetteur 16.

L'utilisation de différents récepteurs 18, c'est-à-dire de différents points de référence sur le boîtier, est imposée par la directivité des ondes  
20 ultrasonores.

Les caractéristiques acoustiques des émetteurs 16 et des récepteurs 18 (en particulier fréquence centrale, largeur de bande) sont choisies de façon à obtenir la résolution souhaitée.

25 Avec cette technique, pour des raisons évidentes de perturbation, les émetteurs 16 doivent émettre les uns après les autres. Les positions des différents éléments respectivement associés à ces émetteurs 16 ne peuvent donc être obtenues  
30 simultanément mais séquentiellement.

C'est pour cette raison qu'il a été question plus haut d'une association dynamique : on entend par là que, lorsqu'un émetteur 16 est activé, les ultrasons qu'il a émis sont captés par tous les récepteurs 18 et que l'on sélectionne, parmi tous ces récepteurs 18, les deux récepteurs ayant reçu les ultrasons de plus grande intensité pour associer ces deux récepteurs à l'émetteur considéré 16.

On voit aussi sur la figure 4 :

- 10 - les moyens 20 de commande des émetteurs auxiliaires 16, permettant d'activer ceux-ci les uns après les autres,
- les moyens 22 qui reçoivent les signaux fournis par les récepteurs 18, sélectionnent deux de ces récepteurs pour les associer dynamiquement à chaque émetteur 16, comme on l'a vu, et déterminent la distance de la face-arrière de l'élément 6 portant cet émetteur par rapport à chacun de ces deux récepteurs associés (d'où la position de la face-arrière de cet élément 6 par rapport au boîtier 14), et
- 20 - les moyens de traitement auxiliaires 24 qui déterminent, comme on le verra plus loin, la position de la face active de chacun des éléments 6 par rapport au boîtier.

La seconde technique repose sur le principe de la phase modulée, appliquée aux antennes micro-ondes.

Cette technique, expliquée dans le document [3] auquel on se reportera, est fondée sur le principe de la diffusion (« scattering »).

Elle consiste à mesurer la perturbation du champ électromagnétique induit par la présence d'une sonde 26 (figure 5) dans le champ d'une antenne à micro-ondes 28. Le signal diffusé par la sonde est donc  
5 capté au niveau de l'antenne, cette antenne étant reliée à une source de micro-ondes 30 et à un récepteur de micro-ondes 32 par l'intermédiaire d'un circulateur 34.

Initialement destinée à la mesure du champ  
10 rayonné par une antenne micro-onde, cette technique permet, par réciprocité, de mesurer la distance séparant la sonde de l'antenne. En effet, si le diagramme de rayonnement de l'antenne est parfaitement connu, la mesure de la phase du champ rayonné à  
15 l'emplacement de la sonde permet de connaître la distance séparant cette sonde de l'antenne.

Afin d'améliorer sa détection au niveau de l'antenne, le signal diffusé par la sonde est modulé à l'aide d'un dispositif non-linéaire 36, typiquement une  
20 diode.

Cette technique de modulation permet en outre l'utilisation simultanée de différentes sondes modulées à des fréquences différentes, la distinction se faisant au niveau du récepteur, par une simple  
25 détection synchrone aux différentes fréquences de modulation. Il est ainsi possible de mesurer simultanément la distance séparant un ensemble de sondes d'une même antenne.

L'utilisation de cette technique est  
30 schématiquement illustrée sur la figure 6 et consiste donc à placer, sur la face-arrière de chacun des

éléments 6 choisis pour l'échantillonnage, une sonde 26  
modulée par un dispositif non-linéaire 36, et à fixer  
sur la face interne du boîtier 14, en regard des sondes  
modulées 26, deux antennes micro-ondes 42 et 44 dont  
5 les positions sur ce boîtier sont connues.

Ces antennes ne pouvant être utilisées  
simultanément, deux séquences d'acquisition sont  
nécessaires pour obtenir la distance séparant chaque  
sonde d'un élément d'une même antenne.

10 Notons enfin que la nature de la distance  
mesurée dépend de la configuration du diagramme de  
rayonnement de cette antenne (ce diagramme étant  
typiquement plan ou sphérique), ce qui autorise ainsi  
différentes configuration d'instrumentation.

15 Sur la figure 6, on voit aussi :

- les moyens 46 de commande des dispositifs non-  
linéaires 36 qui modulent les sondes à des fréquences  
différentes,
- la source de micro-ondes 48 qui active successivement  
20 les antennes 42 et 44 pour que celles-ci émettent  
successivement des micro-ondes et qui sont  
respectivement reliées à ces antennes 42 et 44 par  
l'intermédiaire de deux circulateurs 50 et 52,
- le récepteur de micro-ondes 54 qui traite les signaux  
25 qu'il reçoit successivement des antennes par  
l'intermédiaire des circulateurs 50 et 52, pour  
déterminer la distance de la face-arrière de chaque  
élément 6 portant une sonde 26 par rapport à chaque  
antenne (d'où la position de la face-arrière de cet  
30 élément 6 par rapport au boîtier 14), cette  
détermination des distances se faisant par mesure de

la phase des micro-ondes diffusées par les sondes et le récepteur étant prévu pour distinguer les sondes les unes des autres par détection synchrone aux différentes fréquences de modulation, et

- 5 - les moyens de traitement auxiliaires 24 qui déterminent, comme on va le voir, la position de chacun des éléments par rapport au boîtier 14.

A partir de l'échantillonnage de la surface émettrice de la barrette à éléments multiples 6 (figure 10 4 ou 6), il faut donc obtenir les coordonnées de l'ensemble de ces éléments 6.

Or, la mesure se fait sur la face-arrière ou « backing » d'un élément, alors que le calcul de la loi de retard se fait à partir de la position de la face active ou face émettrice de l'élément c'est-à-dire 15 du côté de la surface émettrice du transducteur.

Un algorithme a donc été développé afin d'obtenir cette dernière information. Il comporte trois étapes.

20 1) A l'aide d'une interpolation par exemple du type pistolet (en anglais « spline ») cubique, nous déterminons la courbe C1 approchant au mieux le profil passant par les points de mesure sur le backing (voir la figure 7 où, à titre d'exemple, six points de mesure 25 M1 à M6 sont représentés).

2) Nous émettons ici l'hypothèse que l'axe de chaque élément (les axes ont les références X1 à X6 sur la figure 8) reste orthogonal à la pente locale à la surface de la pièce contrôlée et à la pente locale à 30 la surface constituée par l'extrémité du backing de

l'ensemble des éléments (les pentes locales ont les références T1 à T6).

A partir du profil de backing, nous déterminons donc, par mesure de la dérivée locale, l'orientation de chaque élément mesuré.

A partir de cette orientation et de la hauteur H de chaque élément, nous obtenons ainsi les coordonnées du point correspondant sur la surface émettrice (ces points correspondants ont les références S1 à S6 sur la figure 8).

3) Nous appliquons enfin une interpolation du type « spline » cubique sur ces points d'échantillonnage de la surface émettrice.

A partir de la courbe C2 ainsi obtenue (figure 9), nous pouvons déterminer la position des différents éléments dans le repère du transducteur c'est-à-dire par rapport au boîtier 14 de ce transducteur dans l'exemple considéré.

Voyons maintenant l'instrumentation de mesure de la position et de l'orientation du transducteur de la figure 4 ou 6.

Cette instrumentation associée au transducteur doit permettre d'obtenir, au cours du déplacement de ce dernier, sa position et son orientation dans le repère fixe de l'objet 8.

Il existe différents capteurs destinés à ce type de mesure.

Dans les exemples des figures 4 et 6, on utilise un bras mécanique articulé 56. Selon la nature passive ou active de ce bras, on mesure ou on contrôle



sa position et son orientation au cours de son déplacement au contact de l'objet.

Dans les exemples des figures 4 et 6, ce bras est muni de divers capteurs 58 permettant de  
5 situer le transducteur ultrasonore dans l'espace et de mesurer son orientation au cours de son déplacement par rapport à l'objet 8.

Un exemple d'un tel bras est la partie mécanique du « bras sinus » commercialisé par la  
10 Société Metalscan (voir le document [5]).

Sur les figures 4 et 6, on voit aussi des moyens 60 qui, en fonction des positions fournies par les moyens 24 et en fonction de la position et de l'orientation fournies par les capteurs 58, déterminent  
15 les positions du transducteur par rapport à l'objet 8.

On voit aussi les moyens de commande et de traitement 62 prévus pour

- engendrer des impulsions d'excitation des éléments 6,
- établir, à partir des positions ainsi déterminées,  
20 des lois de retard permettant aux éléments 6 d'engendrer un faisceau ultrasonore focalisé F, dont les caractéristiques sont maîtrisées par rapport à l'objet 8, et
- appliquer ces lois de retard aux impulsions  
25 d'excitations.

Les éléments 6 fournissent alors des signaux aux moyens 62 également prévus pour former, à partir de ces signaux, des images relatives à l'objet 8. Ces images sont affichées sur un écran 64.

30 Dans le cas où l'on utilise un bras passif (sans capteur) l'utilisateur déplace manuellement le

transducteur, sa position et son orientation étant mesurées par les capteurs 58, et fournies aux moyens 60.

Le bras peut être remplacé par d'autre  
5 moyens tels que des capteurs inertiels par exemple, également aptes à fournir la position et l'orientation du transducteur.

De plus, les exemples donnés utilisent des éléments à la fois émetteurs et récepteurs d'ultrasons.  
10 L'homme du métier peut adapter ces exemples au cas de transducteurs comprenant des éléments seulement prévus pour émettre des ultrasons et d'autres éléments seulement prévus pour recevoir des ultrasons.

Ces exemples sont aussi adaptables à un  
15 transducteur émettant des ondes de Lamb.

De plus, dans ces exemples, on utilise des transducteurs comprenant une barrette linéaire d'éléments ultrasonores mais l'invention n'est pas limitée à de tels transducteurs. L'homme du métier peut  
20 adapter les exemples donnés à des transducteurs matriciels par exemple du genre de ceux dont il est question dans les documents [1], [2] et [4].

En particulier, il faut alors associer dynamiquement à chaque émetteur auxiliaire d'ultrasons  
25 (voir figure 4) non plus deux mais trois récepteurs d'une matrice de récepteurs d'ultrasons fixés au boîtier 14 ou utiliser non plus deux mais trois antennes à micro-ondes dans le cas d'un transducteur matriciel adapté de celui de la figure 6.

Les documents cités dans la présente description sont les suivants :

- 5 [1] D.J. Powell, et G. Hayward, « Flexible ultrasonic transducer arrays for nondestructive evaluation applications PART I : The theoretical modeling approach », IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, vol.43, n°3, mai 1996, pages 385 à 392
- 10 [2] D.J. Powell et G. Hayward, « Flexible ultrasonic transducer arrays for nondestructive evaluation applications PART II : Performance assessment of different array configuration », IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, vol.43, n°3, mai 1996, pages 393-402
- 15 [3] J. CH. Bolomey, « La méthode de diffusion modulée : une approche au relevé des cartes de champs micro-ondes en temps réel », L'onde électrique, 1982, vol.62, n°5, pages 73-78
- 20 [4] Demande internationale WO 94/13411, date de publication internationale : 23 juin 1994, pour « Ultrasonic transducer », invention de G. Hayward et D.J. Powel
- 25 [5] Publication de la Société METALSCAN, Grenoble, France, Référence SINU9506MTS, juin 1995, « Système numérique de contrôle par ultrasons SINUS O.L. O°MTS, pages 1-10.

**REVENDEICATIONS**

1. Transducteur ultrasonore de contact, à éléments multiples (6), chaque élément étant émetteur et/ou récepteur d'ultrasons, le transducteur étant  
5 destiné à être déplacé par rapport à un objet à contrôler (8) et ayant une surface émettrice déformable qui est destinée à être en contact avec la surface de cet objet et à partir de laquelle les ultrasons sont émis vers l'objet, des moyens (62) de commande étant  
10 prévus pour engendrer des impulsions d'excitation des éléments émetteurs, ce transducteur étant caractérisé en ce qu'il comprend des moyens (16, 18, 20, 22, 24, 56, 58, 60; 24, 38, 40, 42, 44, 46, 48, 50, 52, 54, 56, 58, 60) de détermination des positions respectives des  
15 éléments émetteurs d'ultrasons par rapport à l'objet au cours du déplacement du transducteur, des moyens de traitement étant prévus pour
- établir, à partir des positions ainsi déterminées, des lois de retard permettant aux éléments émetteurs  
20 d'engendrer un faisceau ultrasonore focalisé (F), dont les caractéristiques sont maîtrisées par rapport à l'objet, et
  - appliquer ces lois de retard aux impulsions d'excitation,
- 25 les éléments récepteurs d'ultrasons étant destinés à fournir des signaux permettant la formation d'images relatives à l'objet.
2. Transducteur selon la revendication 1, dans lequel les éléments multiples sont constitués  
30 d'une lame de polymère piézoélectrique souple et d'un

réseau d'électrodes juxtaposées obtenues par dépôt métallique.

3. Transducteur selon la revendication 1, dans lequel les éléments multiples sont des éléments piézoélectriques rigides, noyés dans un substrat souple qui est passif vis-à-vis des ultrasons.

4. Transducteur selon la revendication 1, dans lequel les éléments multiples sont rigides et assemblés mécaniquement les uns aux autres de manière à former une structure articulée.

5. Transducteur selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans lequel les moyens de détermination des positions respectives des éléments émetteurs d'ultrasons par rapport à l'objet comprennent :

- des premiers moyens (16, 18, 20, 22, 24; 24, 38, 40, 42, 44, 46, 48, 50, 52, 54) prévus pour déterminer les positions respectives des éléments émetteurs par rapport à une partie indéformable (14) du transducteur, par mesure de la déformation de la surface émettrice, et pour fournir des signaux représentatifs des positions ainsi déterminées,
- des deuxièmes moyens (58, 60) prévus pour déterminer la position et l'orientation de cette partie indéformable du transducteur par rapport à l'objet et pour fournir des signaux représentatifs de la position et de l'orientation ainsi déterminées, et
- des troisièmes moyens (60) prévus pour fournir les positions respectives des éléments émetteurs d'ultrasons par rapport à l'objet à partir des signaux fournis par ces premiers et deuxièmes moyens.

6. Transducteur selon la revendication 5, dans lequel les premiers moyens comprennent :

- des moyens (16, 18, 20, 22; 38, 40, 42, 44, 46, 48, 50, 52, 54) de mesure de la distance, par rapport à des points distincts et fixes de la partie indéformable du transducteur, de la face-arrière de chaque élément d'un sous-ensemble des éléments émetteurs d'ultrasons, et
- des moyens (24) de traitement auxiliaire prévus pour déterminer la position de chaque élément émetteur d'ultrasons à partir des distances ainsi déterminées.

7. Transducteur selon la revendication 6, dans lequel les moyens de mesure de la distance comprennent :

- des émetteurs auxiliaires d'ultrasons (16) respectivement fixés aux faces-arrières des éléments du sous-ensemble et prévus pour émettre des ultrasons les uns après les autres,
- des récepteurs auxiliaires d'ultrasons (18) fixés à la partie indéformable et prévus pour détecter les ultrasons émis par les émetteurs auxiliaires, et
- des moyens (22) de mesure de la distance de chaque émetteur auxiliaire par rapport à chaque récepteur d'un groupe de récepteurs auxiliaires recevant les ultrasons de plus grande intensité.

8. Transducteur selon la revendication 6, dans lequel les moyens de mesure de la distance comprennent :

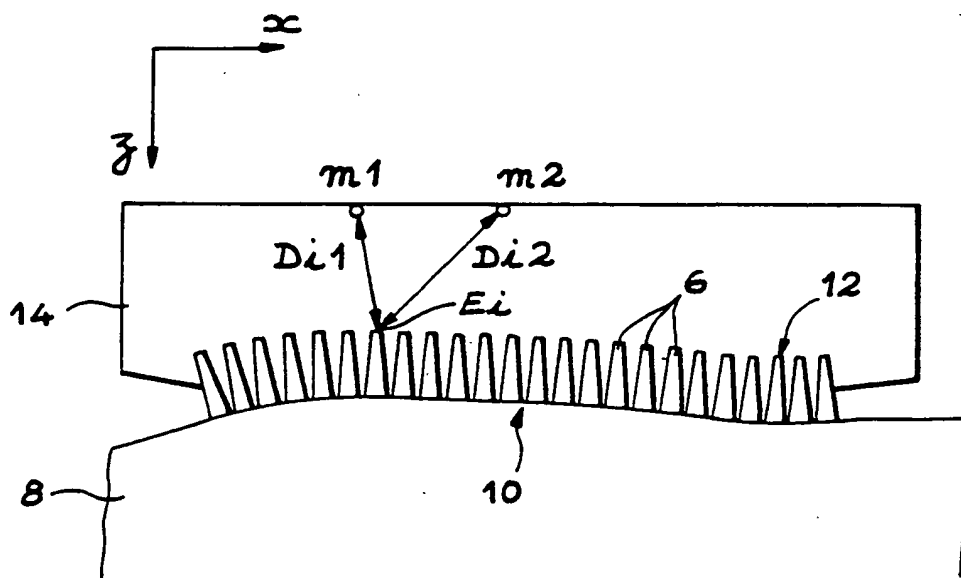
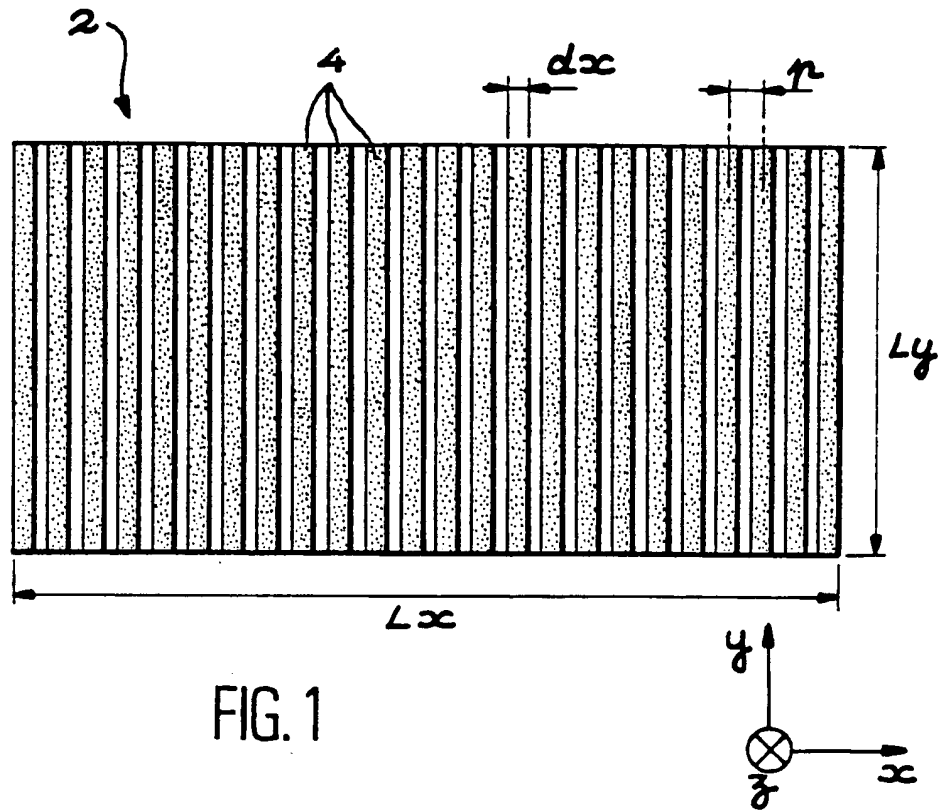
- une source de micro-ondes (48),
- une pluralité d'antennes micro-ondes (42, 44) rigidement solidaires de la partie indéformable,

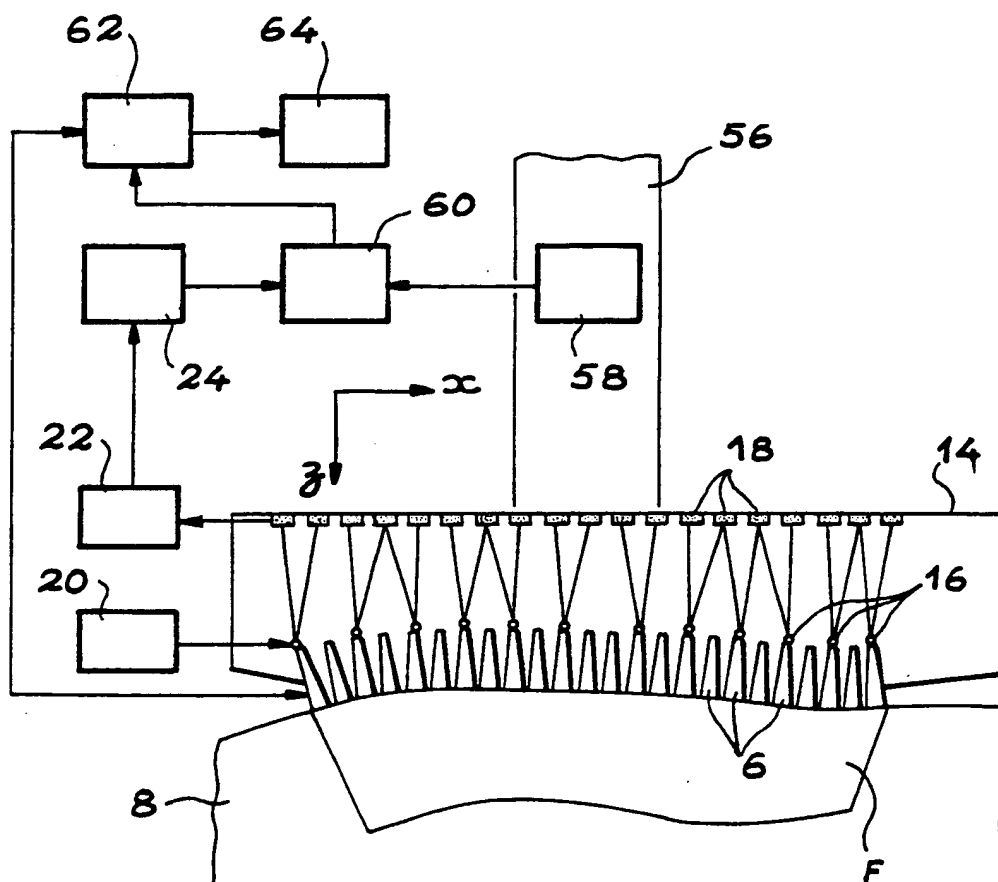
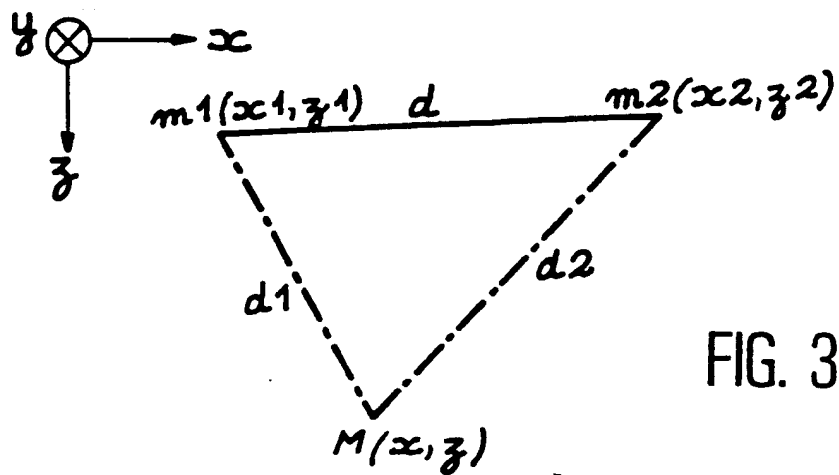
couplées à cette source et prévues pour émettre, les unes après les autres, des micro-ondes et pour recevoir, également les unes après les autres, des micro-ondes,

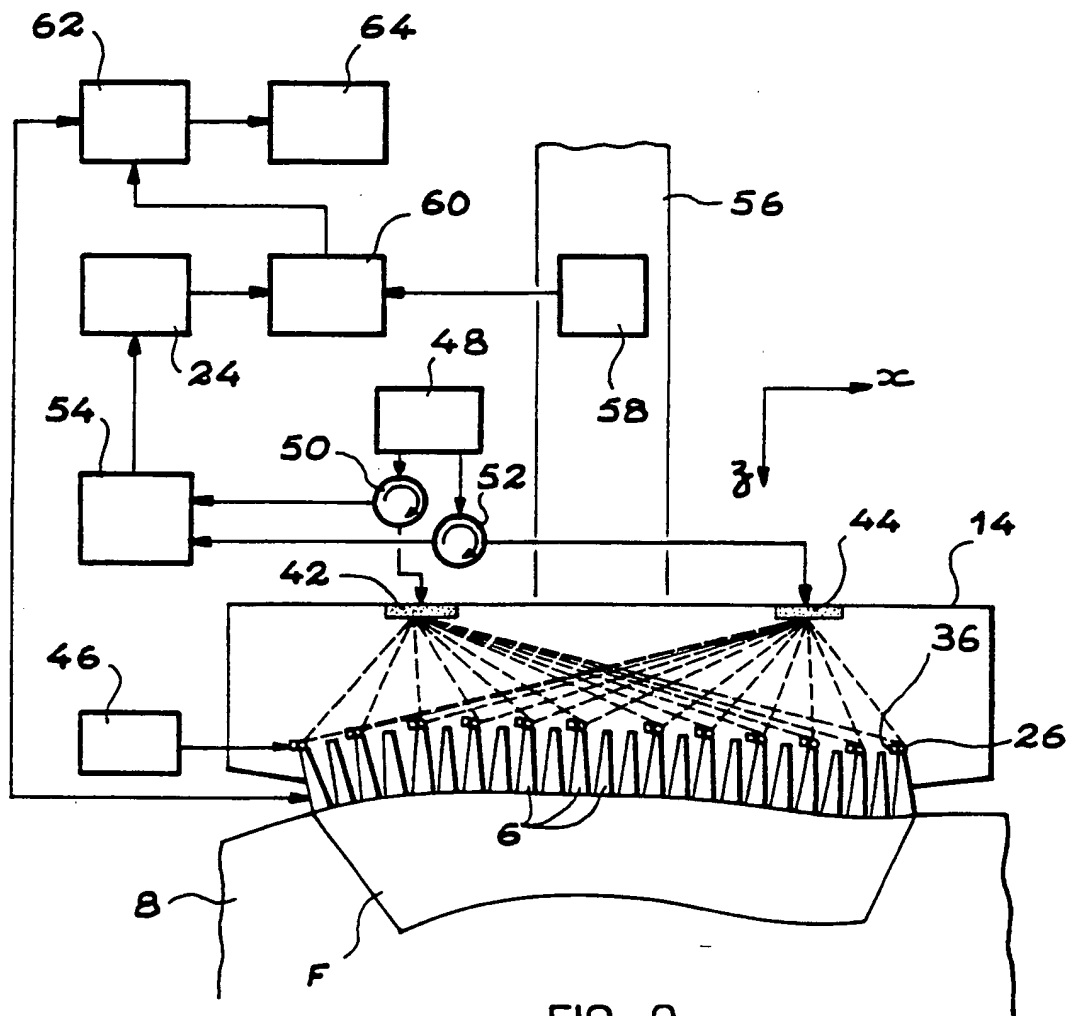
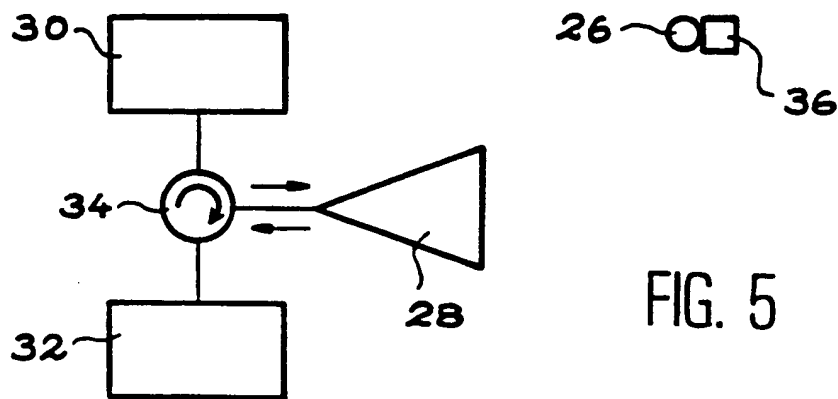
- 5 - des sondes (38) de micro-ondes respectivement fixées aux faces-arrières des éléments du sous-ensemble et prévues pour diffuser les micro-ondes émises par les antennes, ces sondes étant respectivement munies de dispositifs non-linéaires (40) prévus pour moduler, à  
10 des fréquences différentes, - les micro-ondes respectivement diffusées par les sondes, et
- des moyens (54) de réception des micro-ondes couplés aux antennes et prévus pour mesurer la distance de chaque sonde à chaque antenne, par mesure de la phase  
15 des micro-ondes diffusées par cette sonde et reçues par cette antenne, ces moyens de réception étant en outre prévus pour distinguer les sondes les unes des autres par détection synchrone aux différentes fréquences de modulation.
- 20 9. Transducteur selon l'une quelconque des revendications 6 à 8, dans lequel les moyens (24) de traitement auxiliaires sont prévus pour déterminer, par une méthode d'interpolation, un profil passant au mieux par les faces-arrières des éléments du sous-ensemble et  
25 pour déterminer, à partir de ce profil, la position de la face émettrice de chaque élément émetteur d'ultrasons par rapport à la partie indéformable du transducteur.
- 30 10. Transducteur selon l'une quelconque des revendications 5 à 9, dans lequel les deuxièmes moyens

comprennent un bras mécanique articulé (56) solidaire de la partie indéformable (14) du transducteur.









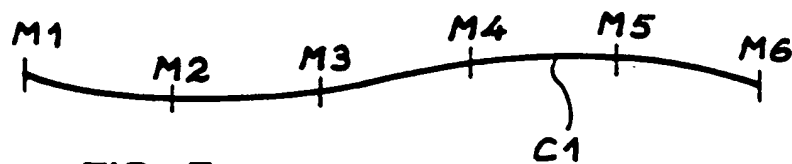


FIG. 7

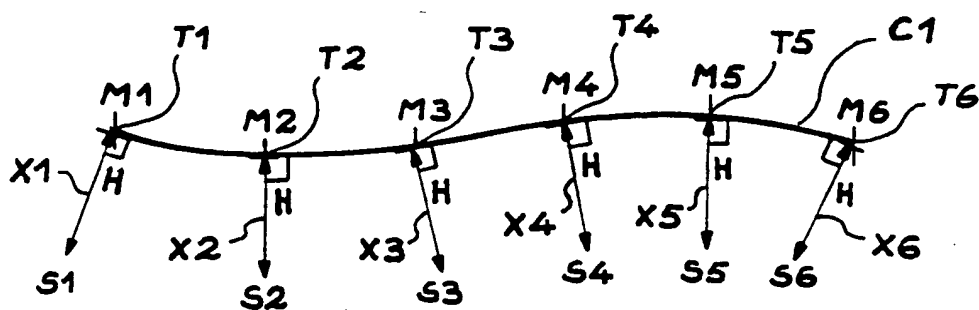


FIG. 8

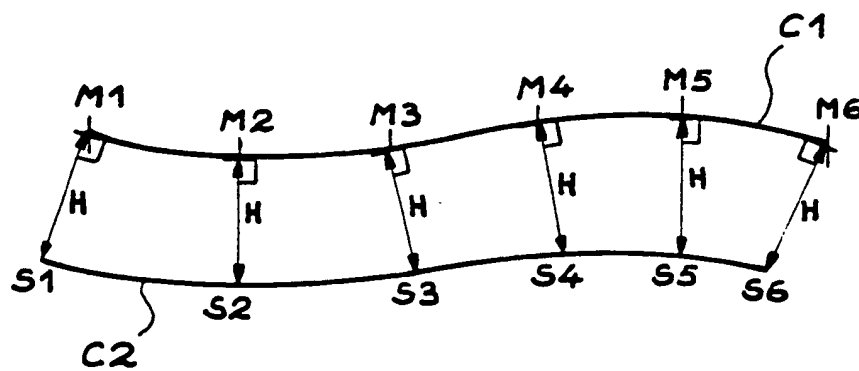


FIG. 9

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/FR 99/02912

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

IPC 7 G10K11/34 G01S5/14 G01S5/30 G01N29/26

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 G10K G01S G01N B06B A61B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
P, X	US 5 913 825 A (SUZUKI MIKIO ET AL) 22 June 1999 (1999-06-22) claims 8-11	1, 4
X	& JP 10 042395 A (KANDA TSUSHIN KOGYO CO LTD; WATANABE HIROSHI) 13 February 1998 (1998-02-13)	1, 4
X	US 5 680 863 A (COOPER THOMAS G ET AL) 28 October 1997 (1997-10-28) column 4, line 14 -column 5, line 6 --- -/-	1

☒ Further documents are listed in the continuation of box C.

☒ Patent family members are listed in annex.

### \* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier document but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

12 January 2000

Date of mailing of the international search report

24/01/2000

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Häusser, T

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No  
PCT/FR 99/02912

## C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	<p>POWELL D J, HAYWARD G: "Flexible Ultrasonic Transducer Arrays for Nondestructive Evaluation Applications -- Part II: Performance Assessment of Different Array Configurations" IEEE TRANSACTIONS ON ULTRASONICS, FERROELECTRICS, AND FREQUENCY CONTROL, vol. 43, no. 3, May 1996 (1996-05), pages 393-402, XP002112831 USA cited in the application page 394</p>	1-3
A	<p>US 4 703 443 A (MORIYASU TAKASHI) 27 October 1987 (1987-10-27) abstract; figure 1</p>	5,10
A	<p>EP 0 312 481 A (EZQUERRA PEREZ JOSE MANUEL ; NOMBELA LOPEZ JAVIER (ES); SANCHEZ FER) 19 April 1989 (1989-04-19) abstract</p>	6,7
A	<p>J. CH. BOLOMEY: "La méthode de diffusion modulée: une approche au relevé des cartes de champs microondes en temps réel" L'ONDE ÉLECTRIQUE, vol. 62, no. 5, May 1982 (1982-05), pages 73-78, XP002112832 France cited in the application page 77</p>	1,8

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

information on patent family members

International Application No

PCT/FR 99/02912

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 5913825 A	22-06-1999	JP 10042395 A	13-02-1998
US 5680863 A	28-10-1997	US 5735282 A	07-04-1998
US 4703443 A	27-10-1987	JP 60170709 A	04-09-1985
		DE 3563652 A	11-08-1988
		EP 0155084 A	18-09-1985
EP 0312481 A	19-04-1989	ES 2005624 A	16-03-1989
		JP 1158375 A	21-06-1989